

桩基挡板式透空堤透浪系数计算及试验研究

陈德春¹, 茆福文¹, 沈丽宁¹, 殷福安²

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 在威格对直板透浪系数研究基础上, 采用微幅波理论并结合不同透空堤结构尺寸(挡浪板宽度与挡板间距之和 D , 桩基的宽度 b 及挡浪板间距 ΔD 组合)推导透空堤透浪系数计算公式. 并基于广东新港荔枝湾防波堤模型试验, 研究了挡浪板的相对入水深度、挡浪板间距、不同波浪重现期对透浪系数的影响, 验证了理论推导透浪系数计算公式的合理性, 计算了波浪条件 $d/L \leq 0.245$ 和 $t/d = 0.35 \sim 0.78$ 范围内的透空堤透浪系数, 为确定合理的透空式防波堤结构提供设计依据.

关 键 词: 挡浪板; 透空式防波堤; 透浪系数

中图分类号: U656.24

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2012)05-0083-05

桩基透空式防波堤是港口水域防浪建筑物中具有发展前景的一种防波堤结构型式, 它根据波能分布主要集中于水体表层的特点, 设计成上部挡浪下部透流的型式, 与传统的实体防波堤相比, 桩基透空式防波堤结构简单, 适用软基, 造价相对较低; 堤身下部透空, 有利于港区水域内外水体交换, 减少港区泥沙淤积.

国内工程界对建设透空式防波堤十分重视, 对此研究颇多^[1-3], 交通部行业规范《防波堤设计与施工规范》^[4]于1999年给出了透空式防波堤结构与透浪系数 K_t 的计算公式. 近10多年来, 基于物理模型试验对透空式防波堤的研究已取得了一定的经验, 国内已有较多桩基透空式防波堤工程建设实例, 如上海吴淞口外炮台湾船舶基地、浙江省舟山市西码头渔港、江苏省洪泽湖16号标船舶避风港、浙江省台州市大陈渔港、广东省徐闻县海安新港等^[5-8].

桩基透空式防波堤物理模型试验研究与工程实践^[5-8]表明, 建设透空式防波堤并达到挡潮消浪效果的关键因素是透浪系数 K_t , 而 K_t 取决于工程区域的水深、波浪要素和透空堤结构尺度. 可实际工程中的水深与波要素关系常常不在规范给出的透浪系数 K_t 计算范围内, 且拟建的透空式防波堤断面结构也与规范中不尽相同, 需根据物理模型试验测定拟建透空式防波堤断面的透浪系数 K_t , 再确定合理的透空式防波堤结构. 本文结合广东省徐闻县海安新港透空式防波堤建设, 考虑水深、波浪与桩基透空堤尺度的关系, 推导桩基挡板式透空堤透浪系数 K_t 的计算公式, 可为类似条件透空堤建设提供计算透浪系数经验, 以确定合理的透空式防波堤结构.

1 桩基透空堤透浪特性理论计算公式推导

根据参考文献[4], 桩基透空式防波堤透浪系数的理论计算公式要求: (1) 适用于水深较大、波高较小而波陡较大 ($d/H \geq 2$, $d/L \geq 0.25$), 且水流和泥沙对港内水域影响不大的情况; (2) 采用单侧挡板透空堤, 宜取堤宽与波长之比 $B/L \geq 0.25$, 挡板入水深度与堤前水深之比 $t/d = 0.3 \sim 0.5$.

分析海安新港防波堤建设条件可知: (1) d/H 在设计规范范围之内时, d/L 均小于0.245, 与规范要求的 $d/L \geq 0.25$ 不符; (2) 挡浪板为单侧非连续板, 板间距为0~0.20 m, 桩基直径为0.6 m; (3) 挡板入水深度与

收稿日期: 2012-02-15

作者简介: 陈德春(1954-), 男, 江苏南京人, 副教授, 硕士, 主要从事港口、海岸及近海工程研究.

E-mail: njxx146204@163.com

水深之比 t/d 与规范不一致, $t/d=0.35 \sim 0.78$.

威格尔^[9]在假定透射能量等于直板下的入射波能量前提下,由微幅波理论推导出有限水深情况下的透浪系数 K_t :

$$K_t = \frac{H_T}{H_1} = \sqrt{\frac{2k(d-t) + \text{sh}2k(d-t)}{2kd + \text{sh}2kd}} \quad (1)$$

式中: H_T, H_1 分别为透射波高和入射波高; k 为波数, $k \geq 2\pi/L$. 本文采用微幅波理论且在威格尔公式的基础上结合海安新港水深、波浪与透空式防波堤尺度变化(桩、挡板间距),推导桩基挡板式透空堤透浪系数计算公式.

设两桩基间的宽度为 D (见图 1 和图 2),通过宽度为 D 的断面总波能流为

$$P_{\text{总}} = D \frac{rh^2}{4} c \left(1 + \frac{2kd}{\text{sh}2kd} \right) \quad (2)$$

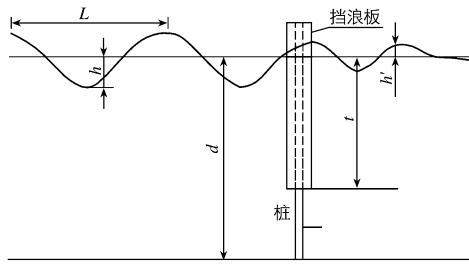


图 1 挡板式透空堤断面

Fig. 1 Section of a permeable breakwater

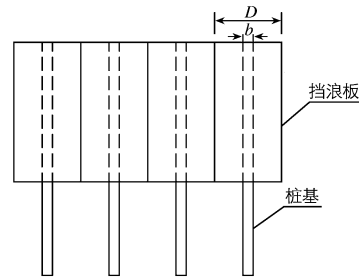


图 2 挡板式透空堤立面

Fig. 2 Vertical profile of a permeable breakwater

设桩基宽度为 b , 则其挡住的波能流为

$$P_1 = b \frac{rh^2}{4} c \left(1 + \frac{2kd}{\text{sh}2kd} \right) \quad (3)$$

当挡浪板在水下的深度为 t (即透空式防波堤的入水深度)时,这部分波能流被挡住,不能传递,则被桩基和挡浪板挡住的能量为

$$P_2 = \frac{rh^2}{4} D \frac{1}{\text{sh}2kd} [\text{sh}2kd - \text{sh}2k(d-t) + 2kt] + b \frac{rh^2}{4} c \left(1 + \frac{2kd}{\text{sh}2kd} \right) - \frac{rh^2}{4} b \frac{1}{\text{sh}2kd} [\text{sh}2kd - \text{sh}2k(d-t) + 2kt] \quad (4)$$

如果两挡板有间距 ΔD ,则从挡板间距间透过的能量为

$$P_3 = \frac{rh^2}{4} \Delta D \frac{1}{\text{sh}2kd} [\text{sh}2kd - \text{sh}2k(d-t) + 2kt] \quad (5)$$

那么传入堤后的波能流为

$$P_{\Delta} = P_{\text{总}} - P_2 + P_3 = \frac{rh^2}{4} c \frac{1}{\text{sh}2kd} (D-b) [\text{sh}2k(d-t) + 2k(d-t)] + \frac{rh^2}{4} \Delta D \frac{1}{\text{sh}2kd} [\text{sh}2kd - \text{sh}2k(d-t) + 2kt] \quad (6)$$

波浪通过堤下传入堤后所形成的波高为 h' ,堤后宽度为 D 的波能流为 P_H .

$$P_H = \frac{rh'^2}{4} c D \left(\frac{\text{sh}2kd + 2dk}{\text{sh}2kd} \right) \quad (7)$$

而 $P_H = P_{\Delta}$,即通过堤下空间的波能流等于波高为 h' 的堤后波能流:

$$\frac{rh^2}{4} c \frac{1}{\text{sh}2kd} (D-b) [\text{sh}2k(d-t) + 2k(d-t)] + \frac{rh^2}{4} \Delta D \frac{1}{\text{sh}2kd} [\text{sh}2kd - \text{sh}2k(d-t) + 2kt] = \frac{rh'^2}{4} c D \left(\frac{\text{sh}2kd + 2kd}{\text{sh}2kd} \right) \quad (8)$$

整理后得到:

$$h^2 \frac{\text{sh}2k(d-t) + 2k(d-t)}{\text{sh}2kd} (D-b) + h^2 \frac{\text{sh}2kd - \text{sh}2k(d-t) + 2kt}{\text{sh}2kd} \Delta D = rh'^2 D \left(\frac{\text{sh}2kd + 2kd}{\text{sh}2kd} \right) \quad (9)$$

则不同板间距桩基挡板透空堤透浪系数计算公式为:

$$K_t = \frac{h'}{h} = \sqrt{\left(\frac{D-b}{D} \right) \frac{\text{sh}2k(d-t) + 2k(d-t)}{\text{sh}2kd + 2kd} + \frac{\Delta D}{D} \frac{\text{sh}2kd - \text{sh}2k(d-t) + 2kt}{\text{sh}2kd + 2kd}} \quad (10)$$

2 公式验证

透空式防波堤结构选型的合理性对消浪效果影响较大,基于广东新港荔枝湾防波堤模型试验研究^[8,10],采用式(10)及《防波堤设计与施工规范》提供的计算公式(以下简称规范公式)计算不同水位、不同波浪重现期与堤身尺度(挡浪板底高程、挡浪板间距)相组合时挡板式透空堤的透浪系数,并综合分析理论推导计算公式、规范公式和物理模型试验^[11-12]结果,验证理论推导计算公式的合理性.该工程中透空堤挡浪板宽度与挡板间距之和 $D=2$ m,桩基的宽度 $b=0.6$ m.试验水位与波浪要素见表1,不同相对入水深度透浪系数的理论推导计算值与试验值比较见表2(其中 $(D-b)/D=0.7$),透浪系数随相对入水深度变化的关系见图3.

表1 水位与波浪要素

Tab.1 Water levels and wave characteristics

水位/m	堤前水深 d /m	重现期/a	波要素 $H_{4\%}$	波长 L /m	波周期 T /s
3.70	5.50	2	2.32	32.85	5.19
		50	2.68	53.02	7.70
2.45	4.25	2	1.69	30	5.20
		50	1.98	46.25	7.55
0.65	2.45	2	1.15	23.55	5.13
		50	1.41	35.27	7.44

表2 透浪系数 K_t 比较

Tab.2 Comparison of K_t

t/d	板间距 20 cm, $\Delta D/D=0.1$						板间距 10 cm, $\Delta D/D=0.05$						板间距 0 cm, $\Delta D/D=0$					
	波浪重现期 2 a			波浪重现期 50 a			波浪重现期 2 a			波浪重现期 50 a			波浪重现期 2 a			波浪重现期 50 a		
	$K_{t计}$	$K_{t试}$	$K_{t规}$	$K_{t计}$	$K_{t试}$	$K_{t规}$	$K_{t计}$	$K_{t试}$	$K_{t规}$	$K_{t计}$	$K_{t试}$	$K_{t规}$	$K_{t计}$	$K_{t试}$	$K_{t规}$	$K_{t计}$	$K_{t试}$	$K_{t规}$
0.35	0.68	0.62	0.68	0.69	0.66	0.70	0.66	0.58	0.68	0.68	0.61	0.70	0.65	0.57	0.68	0.66	0.59	0.70
0.51	0.60	0.61	0.55	0.62	0.54	0.57	0.58	0.53	0.55	0.59	0.56	0.57	0.55	0.52	0.55	0.57	0.55	0.57
0.62	0.53	0.51	0.42	0.55	0.54	0.47	0.49	0.47	0.42	0.52	0.52	0.47	0.46	0.43	0.42	0.49	0.46	0.47
0.71	0.47	0.45	0.33	0.50	0.47	0.39	0.43	0.39	0.33	0.46	0.43	0.39	0.38	0.34	0.33	0.42	0.41	0.39
0.72	0.48	0.51	0.35	0.50	0.47	0.39	0.44	0.42	0.35	0.46	0.44	0.39	0.39	0.37	0.35	0.42	0.40	0.39
0.78	0.44	0.40	0.27	0.46	0.47	0.32	0.39	0.36	0.27	0.42	0.38	0.32	0.33	0.31	0.27	0.37	0.35	0.32

比较透浪系数理论推导计算、规范值和物理模型试验结果得出:

(1) 理论推导公式计算值略大于试验值,相对误差基本上在 10% 以内,且 t/d 较小时,两者相对误差大.

(2) 透浪系数随着挡板相对入水深度 t/d 的增大而逐渐减小.这是因为随着挡浪板入水深度 t/d 的增加,挡板的挡浪面积也随之增加,波能反射得多,从挡浪板底部投射过去的波能随之减少,消浪效果明显增强,故堤后波高较小,透浪系数也随之变小.

(3) 波浪重现期对透浪系数 K_t 的影响:透空堤身尺度不同(挡浪板底高程和板间间距),在入射波高作用下,波浪重现期越大,则透浪系数 K_t 也越大.

(4) 当挡浪板的相对入水深度不变时,随 $\Delta D/D$ 增大,透浪系数也随之增加.

(5)用规范中提供的公式计算出的透浪系数无法考虑 ΔD 的影响,当 t/d 大于0.5时规范值与试验值产生明显的偏差且小于试验值。

综上,由于理论推导 K_t 的计算值时没有考虑波浪能量的损失,也没有考虑堤前的反射对入射波高的影响,计算值与试验值难免产生误差.但是以本文推导公式计算的透浪系数略大于试验值,以透浪系数理论计算值选择透空堤尺度能达到消浪效果。

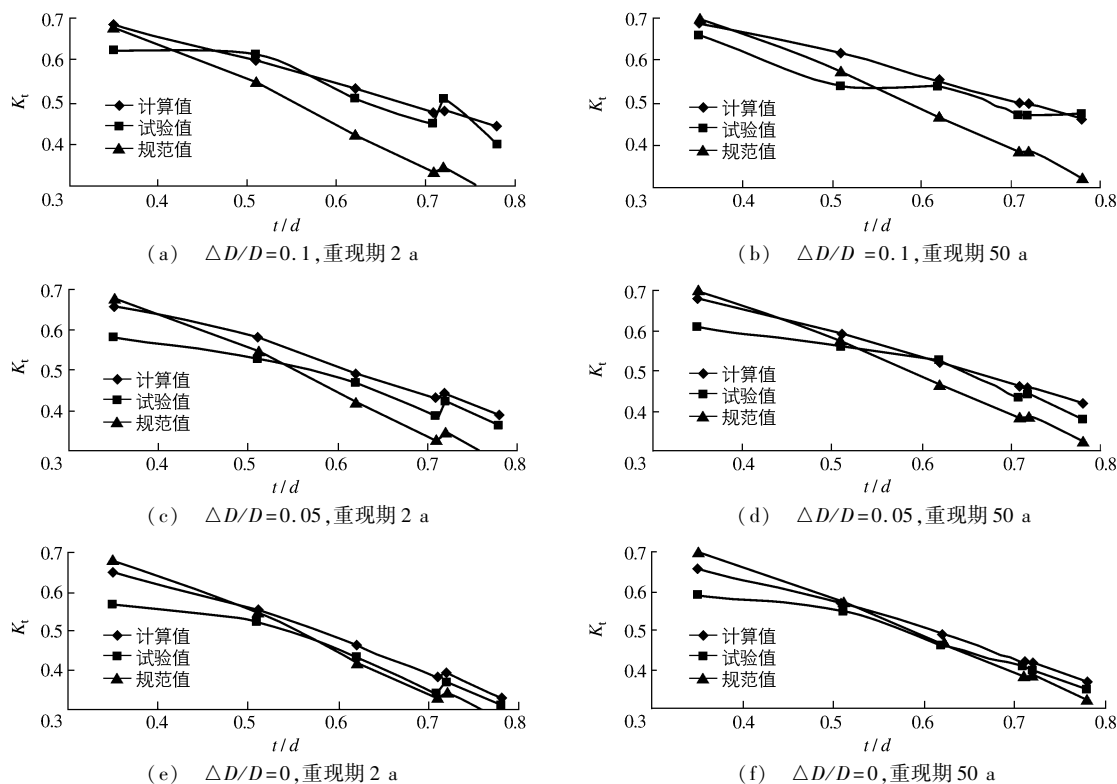


图 3 $t/d-K_t$ 关系

Fig. 3 Relationships between $t/d-K_t$

3 结 语

本文在威格尔对直板透浪系数研究基础上,采用微幅波理论推导不同挡板间距的透空堤透浪系数计算公式,并基于广东新港荔枝湾防波堤模型试验研究,在给定的设计条件下,对不同水位、不同波浪重现期与透空堤尺度(挡浪板底高程、挡浪板间距)组合工况下,采用理论推导表达式计算挡板式透空堤的透浪系数,且与规范值和物理模型试验测定挡板式透空堤的透浪系数进行比较.研究表明:相同工况条件下,透浪系数计算值与规范值及试验值变化趋势是一致的,未考虑波浪能量损失情况下,当 t/d 在0.35~0.50时,理论计算值与规范值吻合相对较好, t/d 大于0.5时规范值与理论计算值及试验值产生明显的误差.透浪系数理论推导计算值略大于试验值,也就是说,在波浪条件 $d/L \leq 0.245$ 和 $t/d = 0.35 \sim 0.78$ 范围内,可用本文推导的公式计算挡板式透空堤透浪系数,为挡板式透空堤结构尺度设计提供科学依据。

参 考 文 献:

- [1] 颜宏. 桩基透空式防波堤结构的分析研究[D]. 南京: 河海大学, 2003. (YAN Hong. Study analysis of wave transmission coefficient of permeable breakwater on pile foundation[D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [2] 钟瑚穗, 徐昶, 过达. 桩基透空堤的透浪系数[J]. 中国港湾建设, 2003, 10(5): 21-24. (ZHONG Hu-hui, XU Chang, GUO Da. Wave transmission factors of permeable breakwater on pile foundation[J]. China Harbor Engineering, 2003, 10(5):

- 21-24. (in Chinese))
- [3] 尹德军, 刘韬, 丁七成, 等. 不同结构型式桩基透空式防波堤功效综合实验研究[J]. 水运工程, 2009(3): 67-69. (YIN De-jun, LIU Tao, DING Qi-cheng. Synthetical experimental study on effectiveness of piled permeable breakwaters with different pile structures[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(3): 67-69. (in Chinese))
- [4] JTJ 298-98, 防波堤设计与施工规范[S]. (JTJ 298-98, Code of design and construction of breakwater[S]. (in Chinese))
- [5] 颜为民. 炮台湾船舶基地透空式防波堤设计[J]. 水运工程, 1992(12): 15-19. (YAN Wei-min. The design of permeable breakwater for the ship base of Paotaiwan[J]. Port & Waterway Engineering, 1992(12): 15-19. (in Chinese))
- [6] 陈德春. 洪泽湖 16 号避风港工程透空堤试验研究[R]. 南京: 河海大学, 2003. (CHEN De-chun. The experimental study of 16th harbor of refuge of permeable breakwater in Hongze Lake[R]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [7] 陈德春. 台州市椒江中咀避风港防波堤断面波浪模型试验[R]. 南京: 河海大学, 2008. (Chen De-chun. The experimental study of harbor of refuge of permeable breakwater in Jiaojiang Taizhou[R]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [8] 陈德春. 广东省海安新港荔枝湾码头一期工程透空式防波堤断面波浪试验研究[R]. 南京: 河海大学, 2004. (CHEN De-chun. The wave experimental study of permeable breakwater in Xingang Lizhiwan Guangdong [R]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [9] WIGGLE R L. Transmission of wave past a rigid vertical thin barrier[J]. Journal of Water Ways and Harbors Division, ASCE, 1960: 1-12.
- [10] 殷福安. 挡板式透空堤透浪特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (YIN Fu-an. Study of wave transmission coefficient about pile breakwater[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [11] JTJ/T 234-2001, 波浪模型试验规程[S]. (JTJ/T 234-2001, Wave model test regulation[S]. (in Chinese))
- [12] JTJ 213-98, 海港水文规范[S]. (JTJ 213-98, Code of design of sea dike project[S]. (in Chinese))

Calculation of wave transmission coefficient and experimental study of a permeable breakwater on pile foundation

CHEN De-chun¹, MAO Fu-wen¹, SHEN Li-ning¹, YIN Fu-an²

(1. College of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Changjiang Institute of Survey Planning and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: Based on Wiegei's research of wave transmission coefficient for the upright type of a permeable breakwater, the theory of micro-amplitude wave and the detailed dimension of permeable breakwater are used (including the total width of wave panel and its separation distance, the width of pile and the separation distance of wave panel) to derive the calculation formula of wave transmission coefficient of the permeable breakwater. By the model test of a breakwater in Xingang Lizhiwan in Guangdong Province, we studied the influence of the relative depth in water, the separation distance of wave panel and recurrence period on wave transmission coefficient. Through comparison of the experimental values and the transmission coefficients calculated by the code and the theoretical formula, the theoretical formula of wave transmission coefficient is proved to be reasonable. The formula can be used when d/L is no more than 0.245 and t/d is between 0.35 to 0.78, and it also can provide a base for the design of the same kind of breakwater.

Key words: wave panel; permeable breakwater; wave transmission coefficient